物探与化探





反射波法检测桩身完整性的 一种频率域数据处理方法

罗伟新

摘 要 从纵波传播过程的反射和透射的基本原理出发,介绍了反射波法桩身完整性 检测数据在频率域中定量确定视反射系数和反射波往返时间的一种新的理论和方法。 关键词 反射波法;频率域;视反射系数;反射波往返时;桩身检测

A FREQUENCY DOMAIN DATA - PROCESSING TECHNIQUE IN THE APPLICATION OF REFLECTION METHOD TO TESTING THE PERFECTION OF PILE BODY

Luo Weixin

(Guangdong Institute of Geological Sciences, Guangzhou 510080)

Abstract Based on the basic principle of reflection and transmission in the process of the propagation of logitudinal wave, this paper recounts a new theory and method for the application of pile body completeness inspection data with reflection wave method to the quantitative determination of apparent reflection coefficients and the round travelling time of reflection wave.

Key words reflection wave technique; frequency domain; apparent reflection coefficient; round travelling time of reflection wave; inspection of pile body

视反射系数和反射波往返时间(分别用 和 来表示)是反射波法检测桩身完整性的定量处理的关键参数。过去由于在频率域中未能从理论上解决这两参数的定量问题,因而在频率域中得不到很好的应用。近年来,笔者发现,实测信号的振幅谱可分解为振源振动的振幅谱和另一函数 |L()|函数。|L()|函数是个由 和 确定的,与振源"无关"的函数,利用它的这一特点就可通过反演来确定出 和 。现就其理论和实际应用方法做一介绍。

- 1 基本理论
- 1.1 反射系数、透射系数及波阻抗的关系 赵景员等认为^{〔1〕},简谐纵波在细杆中传播时,在杆的波阻抗 v(即杆的线密度)

与纵波波速之积)的差异面上会产生反射波和透射波,其强弱取决于反射界面的波阻 抗差异的大小。

设第一、二介质的线密度分别为 ₁与 ₂,第一、二介质的纵波波速分别为v₁与 v₂,波从第一介质进入第二介质时的反射系数 (反射波的振幅与入射波的振幅之比)和 透射系数 (透射波的振幅与入射波的振幅之比),由下式决定

$$\alpha \cos(\Phi) = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2}$$
(1)

$$\beta = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2}$$
(2)

式中, 为反射波与入射波的相位差。

如果 ₁v₁ > ₂v₂,即波从波阻抗大的介质进入波阻抗小的介质时,则cos()=1, =0,即无相位差。反之, ₁v₁ < ₂v₂,则cos()=-1, = ,有半波损失。由此可 见, cos()= 或 cos()=- 。为便于分析,设 可取正或负,则(1)式可写成

$$\alpha = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \tag{3}$$

当 ₁v₁ > ₂v₂时 , >0。当 ₁v₁ < ₂v₂时 , <0。由(2)和(3)式可得

$$\frac{\rho_2 \, v_2}{\rho_1 \, v_1} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}$$
(4)
=1+ (5)

(3)和(4)式就是反射系数与波阻抗的关系式,只要确定了,就可以确定反射界面两侧 波阻抗的差异大小。在桩基质量检测中,桩身波阻抗的变化直接反映桩身质量的变化,所以,通过确定反射界面的反射系数大小来确定桩身波阻抗变化的大小,以此来 推测桩身缺陷的存在及其严重程度。这就是反射波法检测桩基质量的基本依据。
1.2 实测信号的数学表达式

实测信号可以看成是由振源信号和各次反射波的合成,在一般情况下,仅考虑单一反射界面的情况是足够的。为便于分析,现以2个反射界面的情况为例来分析实测信号的数学表达式。如图1a所示,设一振源产生一列往下传播的波列,经过第一和第二界面的反射和透射,将会产生一系列的子波。设界面1和2的视反射系数分别为 1和

2,反射波往返时分别为 1和 2。



图1 波反射和透射示意

1. 设位于桩顶面的振源为f₀(t),产生的纵沿着桩身向另一端传播,经₁/2时间 后,传播至第一界面(图1b),形成反射波(透射波暂不考虑),再经₁/2时间后反射波到 达出发点记为f₁₁(t),称为第一界面的一次反射波,₁称为反射波往返时;同理,f₁₁(t) 又相当于新振源,产生往下传播的子波,经₁时间后,在波阻抗差异面形成的反射波 又返回到出发点,形成第一界面的二次反射波,记为f₁₂(t)。依次类推,可形成第一界 面的n次反射波等。这些多次反射波依次记为f₁₁(t),f₁₂(t),…,f_{1j}(t),…,f_{1n}(t)。且设 桩身材料为理想介质,其对波的吸收系数为零。根据波的反射理论,波在波阻抗差异 面发生反射时,反射波振幅与入射波的振幅成正比,其频率不变。波的相位变化取决 于反射界面的波阻抗变化,于是各次射波与入射波均有如下的关系

$$f_{11}(t) = af_0(t-t_1)$$

$$f_{12}(t) = af_{11}(t-t_1)$$

$$\vdots$$

$$f_{1j}(t) = \alpha f_{1j-1}(t - \tau_1)$$

$$\vdots$$

$$f_{1n}(t) = \alpha f_{1n-1}(t - \tau_1)$$

由于t<0时,f₀(t₀=0且f₁₁(t),f₁₂(t),...,f_{1j}(t),...f_{1n}(t)各列波依次较前一列反射波晚时间后才出 现(接收),所以,在足够长的时间内可接收到的第一界面的各次反射波叠加的结 果,记为。用数学方法表示为

$$f_1(t) = f_{11}(t) + f_{12}(t) + \dots + f_{11}(t_0 + \dots + f_{1n}(t)(6))$$

综合上述各式则有

$$f_1(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_1^j f_0(t - j\tau_1)$$
(7)

2. 设波从第一介质透射到第二介质和从第二介质透射到第一介质的透射系数分别 为₁₂和₂₁。由(3)和(5)式可知,₁₂=1+₁,₂₁=1-₁,所以₁₂·₂₁=1-²₁。令 =₁₂·₂₁,则有 =1-²₁。 被称为来回经过第一界面的透射系数。当波从第一介 质透射进入第二介质后并经第二反射界面反射形成的反射波,又由第二介质透射过一 反射界面,到达出发点时的反射波,称之为第二介质面的一次反射波,记为f₂₁(t),则 它与振源的关系式为

$$f_{21}(t) = (2)f_0(t-2)$$
 (8)

参照(7)式的推导过程,可知波在第二界面产生的一次和多次波反射波(图1c),用f₂ (t)来表示,则有

$$f_2(t) = \sum_{j=1}^{n} (\beta \alpha_2)^j f_0(t - j\tau_2)$$
(9)

3.在第二界面产生的一次反射波可看成是一个振源,与上述第一种情况一样,会 在第一界面产生一次和更多次反射波(图1d),用f₃(t)来表示,则有

$$f_{3}(t) = \sum_{j=1}^{n} \beta \alpha_{2} \alpha_{1}^{j} f_{0}(t - \tau_{2} - j\tau_{1})$$
(10)

除上述3种情况的反射子波外,还有许多反射子波,其数学表达式可以依此类推, 在此不作推导。由于这些子波较上述3种子波弱得多,并考虑桩基检测的实际,实测信 号可近似地认为是振源信号和上述3种子波组成,即

$$f(t) = f_0(t) + f_1(t) + f_2(t) + f_3(t)$$
(11)

2 | L() | 函数

2.1 实测信号的振幅谱和 | L() | 函数 设f(t), f₀(t), f₁(t), f₂(t), f₃(t)的付氏变换依次记为F(), F₀(), F₁(), F₂
(), F₃(), 令F₀()= | F₀() | eⁱ , 对(7)式进行付氏变换则有

$$F_1(\omega) = \sum_{j=1}^n \alpha_1^j F_0(\omega) e^{i(j\omega\tau_1)}$$
(12)

即有

$$F_1(\omega) = |F_0(\omega)| + \sum_{j=1}^n \alpha_1^j e^{i(j\omega\tau_1 + \theta)}$$
(13)

$$L_1(\omega) = \sum_{j=1}^n \alpha_1^j e^{i(j\omega\tau_1 + \theta)}$$
(14)

则

今

$$F_1() = | F_0() | L_1()$$
 (15)

同理,则有

$$F_{2}() = | F_{0}() | L_{2}()$$
(16)
$$F_{3}() = | F_{0}() | L_{3}()$$
(17)

式中

$$L_2(\omega) = \sum_{j=1}^{n} (\beta \alpha_2)^j \mathrm{e}^{\mathrm{i}(j\omega \tau_2 + \theta)}$$
(18)

$$L_3(\omega) = \sum_{j=1}^n \beta \alpha_2 \alpha_1^j e^{i(\omega \tau_2 + j\omega \tau_1 + \theta)}$$
(19)

file:///E|/qk/wtyht/wtyh99/wtyh9903/990313.htm (第5/11页) 2010-3-23 10:22:57

物探与化探990313

令

$$L()=L_1()+L_2()+L_3()+e^i$$
 (20)

因为,

$$F()=F_0()+F_1()+F_2()+F_3()$$
 (21)

所以

$$|F()| = |F_0()| |L()|$$
 (22)

可见,对双界面反射的实测信号f(t)的振幅谱 | F() |,可分解为振源f₀(t)的振幅谱 | F₀() |和另外一个复函数L()的模,即 | L() |函数的积。这对于多于2个界面的情况,这一结论也成立,这里不作推导。

 $L_1() = 1\cos(1+)+i\sin(1+)$ (23)

 $L_2() = 2\cos(2+)+i 2\sin(2+)$ (24)

 $L_{3}() = 2 \cos(2 + 1 +) + i 2 \sin(2 + 1 +)$ (25)

因此,结合(20)式可求出当n=1时的 | L() | ²表达式为

 $| L() | ^{2} = ^{2}_{1} + (^{2}_{2})^{2} + (^{2}_{2})^{2} + 1 + 2 ^{1}_{1}(1 + ^{2} ^{2}_{2})\cos ^{1}_{1} + 2 ^{2}_{2}(1 + ^{2}_{1})$ $\cos ^{2}_{2} + 4 ^{2}_{2} \cos ^{1}_{1}\cos ^{2}_{2}(26)$

可知,当n=1时,|L()|²与 无关,即为与振源无关的函数。同样可以证明,当 n>1(实际中,n 3即可,我们一般取5)时,|L()|²是一个与振源无关的函数,它是 由反射界面的反射系数和反射波往返时间所决定的余弦函数。令 =0,则(14),(18)和 (19)式可写成

$$L_1(\omega) = \sum_{j=1}^n \alpha_1^j e^{i(j\omega \tau_1)}$$
(27)

$$L_2(\omega) = \sum_{j=1}^{n} (\beta_1 \alpha_2)^j e^{i(j\omega \tau_2)}$$
(28)

$$L_3(\omega) = \sum_{j=1}^n \beta_1 \alpha_2 \alpha_1^j \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(\tau_2 + j\tau_1)}$$
(29)

这3个函数式是由反射界面的 和 决定的,以 为自变量的复函数。在实际中,我们 利用由这三个函数组成的L()函数的模即 | L() | 来反演实际的 | L() | 曲线,达 到确定 和 值的目的。目前,我们主要应用于解决一两个主要反射界面的情况下的 和 的定量问题。步骤如下:

1. 利用实测时域曲线的振幅谱,通过模拟振源信号的振幅谱即 $|F_0()|$, 由(22) 式来确定|L()|曲线。 $|F_0()|$ 可由下式计算出

$$|F_0(\omega)| = \frac{A\omega}{\sqrt{(\beta - \omega + \omega_0)^2 + (2\beta\omega)^2}}$$
(30)

式中,A为振源初始振幅,₀为振源角频率,为振动衰减率。在模拟 | F_0 () | 时,A取时域曲线中的振幅极大值,一般通过改变₀(₀=2 f_0)和 值就可模拟出 | F_0 () | 曲线。当振源的频率成份较复杂时,可采用逐个拟合的办法进行拟合^[1];

2. 由(27)式(相当于其它界面的反射系数为零)对主要反射界面引起的 | L() | 曲线 异常,通过改变 f(=1/ f)和 的值,进行反演,每改变一次 f(最小步距取±1Hz) 和 (最小步距取±0.01)值,可做一次相应的计算(由计算机完成)和比较(人工观察比 较),直到两曲线达到要求的"相似"程度为止。应用中,一般曲线的频率特征较显 著,所以,常用有限的几次模拟就可准确地确定 f,然后再确定 值,效果较好。

3. 根据第一次模拟的情况,分析是否存在另一界面的反射特征,若存在另一界面的特征,以第一次模拟的 f和 为第一界面的初值,再利用(27),(28)和(29)式,通过改变另一界面的 f和 反演 | L() | 曲线。本步一般也是先确定 f,然后再确定值。上述方法对反演单一或两个反射界的问题,一般可得到较好的结果,很少出现多解情况。反演中,第二、第三步可交递进行,且不必考虑界面的上下位置,只要根据 其异常的强度按由强至弱的顺序进行反演就行。对于 | L() | 曲线的纵横坐标的比例尺也可根据实际的需要,和模拟曲线按一定的比例同步放大或缩小。

3 应用分析

1. 增城市某工程(拟建13层)147号桩,是施工桩径为0.48 m,桩长为18.1 m的锤击灌注桩,桩身砼设计强度等级为C20,单桩承载力设计值为600 kN。测试仪器为长沙GJY-1型工程检测仪器。测试结果反映此桩在浅部出现严重的缺陷,开挖结果是测试面下约1.3 m处出现严重缩径,量得的最小桩径约为0.26 m。实测资料的处理过程简述如下: 图2为一条全通实测时域曲线,进行频谱分析得到振幅谱,通过模拟 | F_0 () | 曲线确定 | L() | 曲线(参见图3),对 | L() | 曲线进行反演(参见图4)可得到: =0.50 和 f₁=1 274 Hz(=0.78 ms),按其波速v_p=3 500 m/s进行推算,桩身缺陷上界面的位置在测试面下1.35 m处,界面的视反射系数为 =0.50。因 =0.78 ms较小,可不考虑波的吸收,直接把 =0.50代入缩径桩的近似公式S₂/S₁ (1-)/(1+)的近似公式^[1,2], S₂/S₁ 0.33,即缺陷处的桩身有效桩截面积S₂仅相当于正常桩身有效截面的33%;换算成桩径比d₂/d₁=0.574,取d₁=0.48 m,则d₁=0.28 m,与实际情况接近。





图4 |L()|曲线反演 1—|L()|曲线;2—反演的|L()|曲线

实测时域曲线(图2),因振源振动的周期与反射波往返时间相近,且反射波与振 源同相位,因此,两者叠加后曲线未出现明显的畸变。这种情况在时间域中分析是很 容易出现对严重缺陷的漏判或轻判,而本方法则轻而易举地解决了这一难题,其定量 效果较好。

2. 增城市某供电局办公楼(拟建3层)28号桩,是桩径为0.48 m,桩长为17.5 m的锤击 沉管灌注桩,桩身砼设计强度等级为C20。测试仪器为长沙CE9201土建工程质量检测 仪。图5为一条实测时域曲线,通过振幅谱模拟出 | F₀() | 曲线并确定 | L() | 曲线 (图6),对 | L() | 曲线进行2次反演后,两曲线已经比较相似了(图7和图8)。反演结果 为:第一和第二反射界面的 分别为0.30,-0.24;频差分别为 f=645 Hz(=1.55 ms), f=485 Hz(=2.06 ms)。按波速v_P=3 300 m/s推算,两反射界面分别位于测试面下2.5 m 和3.4 m,相距约0.9 m,且上下界面的视反射系数为一正一负,上界面的为正,表明波 阻抗是由高变低,推测缺陷性质为缩径。将 =0.30直接代入缩径桩的近似公式得出S₂/ S₁ 0.54,其桩径比为d₂/d₁ 0.73,取正常桩径d₁=0.48 m,可算出d₂ 0.35 m。开挖结 果表明,在测试面下约2.5 m开始出现缩径,约3.3 m后开始恢复正常,量得缩径段的最 小桩径约0.36 m,与动测结果较接近。这是本法定量确定缩径桩的缺陷上下界面的距离 及其严重程度基本过程。





图8 | L() | 曲线反演

1— | L() | 曲线; 2—第二次反演的 | L() | 曲线

4 结论

实测信号的振幅谱,可分解为振源振幅谱与另一函数——|L()|函数。|L() |函数是由桩身反射界的 和 决定的,与振源无关的函数。根据它的这一特性,就 可通过改变 和 这2个参数来反演实际的|L()|曲线,进而达到确定出 和 的 目的。

值得一提的是:本法目前主要用于处理桩径小于0.8 m的工程桩,对解决时间域处 理较困难的浅部缺陷,其应用效果非常突出,但对于桩径较大的桩,由于波在浅部具 有"非平面波"的特性,用 来分析缺陷的严重程度时要考虑缺陷的局部性,即其严 重程度不一定代表整个桩截面的严重性;对深部的缺陷还有必要对 进行一定的波的 吸收和反射界面的校正才能用于定量分析;对于缩径以外的其它缺陷,同样也可用 的大小来分析缺陷的严重程度^{〔3〕}。

作者简介 罗伟新,男,1959年9月生于广东省兴宁县。1995年毕业于长春地质学院应 用地球物理专业。现任广东省地质科学研究所桩基检测中心主任,高级工程师,1991 年至今从事桩基检测工作。发表5篇论文。

作者单位:罗伟新 (广东省地质科学研究所,广州 510080)

参考文献

[1] 赵景员, 王淑贤.力学.北京:人民教育出版社, 1997

[2] 罗伟新.单界面反射的反射波法频率域解释方法的研究.地球物理学报, 1997,40(4):580~587

[3] 罗伟新.反射波法检测桩身完整性的一种数据处理方法.物探与化探,1998, 22(3):216~221

1998年9月24日收稿,同年12月9日收修改稿